

# 터널 화재진압시스템 도입에 따른 재난 안전비용의 경제성 분석 연구

백충현\*  
\*(주)서현기술단

## A Study on the Economic Analysis of Disaster Safety Costs by the Water-Bulwark System against the Tunnel Fire

Chung - Hyun Baek\*  
\*Seohyun Engineering Vice President

### Abstract

This study attempted to analyze the comparative advantage in terms of disaster safety costs in verifying the effectiveness and economic feasibility of the high-performance water-bulwark system in the pole tunnel, which was recently promoted as a part of the acceleration of vehicles. The tunnel to be analyzed was divided into a short tunnel(Anyang, Cheonggye) and a long tunnel(Suraksan, Sapaesan).

As a result, it was analyzed that 25% of the improvement effect would occur if one lane was secured by applying the Water-Bulwark System. It was analyzed that this is because the time value cost, which accounts for a large proportion of the traffic congestion cost of short tunnels and pole tunnels, differs depending on the congestion time and traffic volume, not the length of the tunnel.

**Keywords :** Water-Bulwark System, Economic Analysis, Tunnel fire, Disaster Safety

### 1. 서론

최근 소방청은 2022년 12월부터 ‘화재의 예방 및 안전 관리에 관한 법률(이하, 화재예방법)’과 소방시설 설치 및 안전관리에 관한 법률(이하, 소방시설법)’의 하위 법령 개정을 입법 예고하였다.

이 두 법령의 하위 법령은 매우 방대한 내용을 담고 있는데, 우선 화재예방법에서는 화재위험평가와 화재예방안전진단 제도를 새롭게 도입하고 소방안전관리자에 대한 겸직금지 의무, 소방안전관리 업무대행 업체 등에 대한 필수 준수사항, 그리고 건설현장 소방안전관리자선임 대상과 신고기간 설정, 마지막으로 소방안전 관리자의 교육 시간 확대 등 많은 내용의 개정이 포함된다. 소방시설법의 하위법령에서는 국립소방연구원이 맡게 되는 화재안전 기술기준의 세부 절차를 마련하고, 성능위주 소방설계 대상물을 확대하고 차량용 소화기 설치의 근거 마련과 방염대

상물품의 종류와 대상의 재정립, 소방시설 자체점검 제도를 재 설계하였다.

특히 소방시설법 하위법령에서의 성능위주 소방설계 대상물 확대 및 소방시설 자체점검 제도 등은 기존 화재 시설물의 작동 성능 향상을 위해 새로운 시설물의 개발 및 도입 확대가 예상된다. 이는 사업자로 하여금 기존 시설물과의 성능 비교분석을 통해 새로운 화재시스템의 도입 여부를 결정할 것이며, 이는 결국 성능 대비 경제성을 확보할 수 있는 결과로 귀결될 것이다.

최근의 터널화재와 관련한 주요 연구를 살펴보면 대부분 화재진압을 위한 신기술 개발에 관한 내용이 많아, 본 논문에서의 신기술에 대한 경제성 평가까지 이루어진 논문은 매우 드물다. 이와 관련하여 대표적인 선행연구를 살펴보면 손무락 등(2023)은 ‘터널 내 화재발생에 대한 콘크리트 세그먼트 라이닝의 내화성 평가 및 내화방법에 대한 고찰’에서 터널구조물의 구조적 안정을 위해 이루어지

†Corresponding Author : Chung - Hyun Baek, 6F, Seohyuneng Bldg. 500 Heungan-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, Korea, E-mail: uman2943@naver.com

는 다양한 형태의 라이닝 기술 중 TBM터널 공사에서 콘크리트 세그먼트 라이닝에 대한 영향 및 관련기준, 내화성 평가 및 내화방법에 대한 문헌조사를 시행하여 실무자를 대상으로 콘크리트 세그먼트 라이닝의 안전 확보에 관한 정보 제공 수준의 논문을 제시하고 있다. 박진욱 등(2018)의 ‘복층터널 화재대응을 위한 원격 자동소화 시스템 개발 연구’에서는 기존 터널 방재시설(소화설비)이 가지는 문제점 보완 및 복층터널의 구조적인 특수성에 최적화되어 있는 원격 자동소화 시스템 개발에 대한 내용을 담고 있다. 그 결과 낮은 층고를 고려한 장거리용 설비와 보급성을 확대한 옥내소화전용 설비 등 두 가지 형태의 시스템에 대한 성능 검증을 완료하고, 실용화를 위한 노력을 추진 중에 있다고 밝혔다. 김학근 등(2017)의 ‘도로터널 화재시 효과적인 소방활동 전략 수립을 위한 시나리오 연구’에서는 도로터널 화재발생 시 소방대원의 효과적인 소방활동 전략 수립에 도움을 주기 위한 논문으로 국내외 73건의 터널화재사고사례를 조사하여 4가지 사고유형으로 분류하고, 소방활동의 전략수립을 위해 개입시간과 열방출률의 관계로 6가지 화재시나리오 곡선을 도출하였다. 그 결과 도로터널 분류 모델은 각 소방기관이 관할 터널의 화재 위험 정도를 화재 진압의 관점에서 평가하고 예방조치를 수립하는데 사용될 수 있다.

박경환 등(2012)의 ‘정량적 위험성 평가를 활용한 도로터널 화재 시 물분무 소화설비의 피난 안전효과 연구’에서 도로 터널에 설치하는 물분무소화 설비가 피난성능을 개선시키는 데에 대한 검증 연구를 시행하였다. 이 논문은 3종류의 화재 크기와 27개의 화재시나리오에 대한 화재 평가와 피난평가를 시행하였는데, 물분무소화 설비가 있는 경우에는 반대 상황과 비교하여 1명, 10명, 100명 이상의 사망빈도가 각각 50배, 100배, 4배 감소한 것으로 나타나, 결과적으로 물분무소화 설비는 도로 터널 화재 시 고온 기류의 냉각작용과 독성가스의 세척 효과를 통해 피난에 유리한 조건을 제공하는 것으로 나타났다. 이 논문은 본 논문의 안전성을 측정하는 것과 유사하기는 하지만, 실제 현장 적용을 위한 경제성 분석까지는 담지 못하고 있다.

박정현 등(2017)의 ‘철도터널 화재에 대한 정량적 위험도 분석’의 연구에서 국내외 철도터널 방재기준들이 신속한 대피를 위해 많은 비용이 소요되는 대피통로 설치 기준을 강화 적용하고 있다고 지적하고, 국내 기준의 경우 1km 이상 연장의 터널별 QRA 분석을 통해 위험 수준에 따른 설치 여부를 결정토록 하고 있으나, QRA 분석에 필요한 화재발생확률, 화재발생 시나리오, 화재규모, 사회적 위험도 평가기준 등에 대한 세부적용기준들이 정립되어 있지 않아 과다설계로 인한 사회적 추가비용 발생의 문제점을 지적하고 있다. 하지만 이 논문 역시 터널 위험도의 정량적 평가, Case별 방재시설 계획 기준, 시나리오 분기

산정 시 적용조건에 대한 발생확률, 그리고 국내 관련 규칙 및 기준의 개정 필요성에 대한 언급이 그 핵심 내용으로 다루어지고 있어, 실제 경제성 분석을 위한 기술의 선택 가능성에 대한 연구내용까지는 다루지 못하고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 최근 차량의 고속화의 일환으로 추진되어진 장대터널에서의 안전시설로서의 고성능 화재진압시스템(Water-Bulwark System)의 기존 시스템 대비 효과 검증과 경제성에 대해 재난안전 비용의 관점에서 그 비교 우위를 분석하고자 하였다. 또한 이 논문은 Water-Bulwark System 개발에 관한 기술 논문의 후속으로 해당 시스템의 경제적 타당성을 도출하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 터널사고 통계현황

아래의 <Table 1>은 경찰청 교통사고분석시스템(TAAS)을 활용하여 2019~2021년의 3년간 서울과 경기에서 발생한 주요 터널 내 교통 사망사고 사고를 도출한 결과이다. 비교적 저속 운행이 많은 서울 도심부에서는 터널 내에서 운전자의 안전운전불이행으로 인한 사고가 6건(66.7%)로 나타났고, 경기도에서는 9건(100%) 모두 운전자의 터널 내 차선변경 등으로 인한 안전운전불이행으로 인해 발생한 것으로 분석되었다. 또한 시간대별로 봤을 때, 심야시간대에 발생한 터널 내 사망사고는 서울이 4건(44.4%), 경기도가 5건(55.6%)로 나타났다. 특히 터널 내 차선변경으로 인한 차량 사고는 과속 등으로 인해 화재로의 전이 가능성이 비교적 높기 때문에 철저히 관리해야 할 필요가 있다.

이상의 사고 특성을 살펴보면 경찰청 사고조사 보고서를 좀 더 종합적으로 분석할 필요가 있겠지만, 터널 내 사망사고는 주말 심야 시간대 과속 및 무리한 차선 변경으로 인해 사고가 빈번한 것으로 추측된다.

<Table 1> The Traffic Acci. in Tunnels(2019-2021)

Acci. Date	Dis.	week	District	Type of Accid.	Violation
Oct. 2019	Seoul	Wed	Sang-Gye, No-won	Veh-veh, Collis.	Failure to drive safely
Dec. 2019		Thu	Sing-jong, Yang-chon	Veh-Per, etc	Speeding
Feb. 2020		Tue	Sing-jong, Yang-chon	Veh-Veh, etc	signal viola.
Mar. 2020		Thu	Woo-Myun, Seo-cho	Veh-Veh, Collis.	Failure to drive safely

Acci. Date	Dis.	week	District	Type of Accid.	Violation
Sep. 2020		Tue	Sinsa, Eun-pyung	Only Veh, Workpiece collis.	Failure to drive safely
Nov. 2020		Fri	Gu-ro, Guro-gu	Only Veh, Rollover	Failure to drive safely
Nov. 2020		Fri	Sinrim, Gwan-Ak	Only Veh, Workpiece Collis.	Failure to drive safely
Feb. 2021		Sun	Sang-Gye, No-won	Only Veh., Workpiece Collis.	Speeding
July. 2021		Sat	Myun-mok Jung-Rang	Only Veh, Workpiece Collis.	Failure to drive safely
Jan. 2019		Sat	Cho-wol, Gwangju-si	Veh-Veh, Collis.	Failure to drive safely
Mar. 2019		Thu	Jang-an-gu, Su-won	Only Veh, etc	Failure to drive safely
May 2019		Sat	Chung-gye Uiwang-si	Veh-Per, Working in road	Failure to drive safely
Dec. 2019		Tue	Byul-nae, Namyangju	Only Veh, Workpiece Collisi.	Failure to drive safely
Dec. 2019	Gyeong-gi	Sun	Wabu-eup, Namyuangu	Only Veh, etc	Failure to drive safely
June 2020		Mon	Gyo-mun, Guri-si	Veh-Veh, Collis.	Failure to drive safely
July. 2020		Thu	Jang-an, Su-won	Only Veh, Workpiece Colli.	Failure to drive safely
Aug. 2021		Sat	Bundang, Sung-nam	Only Veh, Workpiece Colli	Failure to drive safely
Dec. 2021		Tue	Chu-in, Yong-in	Veh-Veh, Colli.	Failure to drive safely

## 2.2 터널 방재 시설

기존의 터널 내부 방재시설로는 수동식 소화기와 옥내 소화전설비 및 물분무 소화설비 등이 도입되어 있다. 수동식 소화기 설치하는 일방통행터널의 경우 4차로 미만은 주행차로 우측 측벽에 설치하고, 4차로 이상은 터널 양 측벽에 설치하도록 하였다. 대면통행터널에서는 양쪽측벽에 교차하여 설치하고 격납상자 설치를 내부에 2개1조로 비치하는데 이때의 설치간격은 50m 이내로 정하고 있다. 옥내 소화전 설비는 1~3차로인 편도일방행 터널은 주행차로 우측면 측벽이나 편도 2차로 미만의 양방향 대면통행 터널은 양쪽 중 한 곳의 측벽에 설치한다. 그리고 4차로 이상의 편도 일방통행 터널과 편도 2차로 이상의 양방향 대면통행이 가능한 터널에서는 양쪽 측벽에 이중 설치하도록 한다. 이 경우에는 설치 간격을 50m 이내로 한정한다. 물분무소화 설비는 도로면 전체에 균일하게 방수되도록 측벽에 설치하고 설치간격은 방수구역 25~50m로 한정하였다. 또한 수동식 소화기와 옥내소화전설비 및 물분

무소화 설비는 터널에서 화재진화시 별도 차량통행 차로가 확보되어 있지 않아 외부 소방차 및 구조차량의 접근이 어렵고, 터널 내 차량의 외부 탈출 역시 쉽지 않다.

### 2.2.1 소화설비시스템의 유형

국도교통부(2021)의 ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침’에서의 도로터널 내 소화설비는 차량 화재 시 화재 진압 및 소화를 위한 설비로 소화기, 소화전, 물분무소화설비(미분무소화설비 포함), 원격자동소화설비(소형자전거)가 있으며, 작동방식에 따라 수동식과 자동식 소화설비로 구분한다. 소화기구는 소규모 화재의 초기소화를 목적으로 사람이 직접 조작하여 소화약제를 방출하고, 이를 사용하는 대상이 차량에 탑승한 터널 이용자를 감안하여 운전 및 취급이 용이하도록 선정하고 접근성이 용이한 위치에 설치토록 하였다. 옥내소화전설비는 화재에 대한 주체적인 소화설비로, 호스 및 방수노즐을 이용하여 소화용수를 방출하는 소화설비로 터널 내 소화전은 호스연결식 옥내소화전을 말한다. 물분무소화설비는 고압, 중압, 저압의 소방용수를 물분무 헤드 또는 노즐에 의해 입자상으로 방출하여 질식·냉각작용에 의해 화재연소 및 확대를 억제하여 대피자의 보호, 소화활동의 지원, 구조물 보호를 위한 소화설비 등으로 구성된다.

소화설비 외에도 경보설비(비상경보설비, 자동화재탐지설비, 비상방송설비, CCTV 등)와 피난대피설비(비상조명등, 유도등, 피난대피설비 등), 소화활동설비(제연설비, 무선통신 보조설비, 연결송수관설비 등)와 비상전원설비(무정전 전원설비, 비상발전설비 등)이 구성되어 있다.

### 2.3 터널의 정량적 위험도 평가 방법

‘도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침’에서의 도로터널의 정량적 위험도 평가 측정은 방재시설의 설치 또는 적정성 여부를 판단하기 위한 기준을 제시해서 도로터널의 방재시설에 대한 성능설계를 수행하기 위해 활용되고 있다. 터널의 경우 추돌 및 충돌 등 일반사고와 터널 붕괴와 집중호우 등으로 인한 수해, 터널 내 화재 등 다양한 사고를 포함 하지만 정량적 위험도 평가는 화재사고에 한해 실시토록 하고 있다. 위험도 평가는 다양한 시나리오에 대한 사상자수(fatalities) 및 사고자가 발생하는 누적빈도(frequency)에 대한 분석을 수행하여 사망자-누적빈도 선도(F/N curve)를 그래프 화하여 이를 사회적 위험도(Societal Risk) 기준과 비교함으로써 방재시설의 규모나 적정성 여부를 판단하고 있다.



$$\text{운행비} = \sum_{k=1}^3 (\text{차종별 시간교통량}_k \times \text{해당속도차종별 운행비용}_k)$$

$k = \text{차종}(1: \text{승용차}, 2: \text{버스}, 3: \text{화물차})$  (식-2)

③ 분석 교통량

본 연구에서의 적용대상은 <Table 2>와 같이 수도권제 1순환고속도로의 편도 4차로 광폭 터널인 청계터널, 안양터널, 사패산터널, 수락산터널을 선정하였다. 이중 450m인 청계터널과 390m인 안양터널은 상대적으로 길이가 짧고, 3,993m인 사패산터널과 2,950m인 수락산터널은 장대터널에 포함된다.

<Table 2> One-way traf

Tunnel	Tunnel Extension		Width	Roadway number (one-way)
	Upward (clockwise)	Down(counterclockwise)		
Cheong-gye	450m	550m	17.6m	4way
An-yang	390m	390m	17.5m	4wayf
Sapae-san	3,993m	3,997m	17.6m	4way
Surak-san	2,950m	2,950m	17.6m	4way

<Table 3>는 교통량정보제공시스템에서 제공되는 교통량 데이터를 기반으로 침두시인 8시~9시 1시간 동안을 기준으로 한 것이고, <Table 4>은 침두시간 터널 내 일방향 교통량을 나타낸 것이다.

<Table 3> Traffic volume in the tunnel

Tunnel	Daily traffic volume(veh/day)					
	a car	bus	small truck	heavy-duty truck	large truck	total
Cheong-gye	146,843	3,993	27,242	4,685	773	183,536
An-yang	134,503	3,642	25,369	4,355	713	168,582
Sapae-san	94,081	1,837	26,171	7,456	663	130,208
Surak-san	65,184	2,529	23,692	7,076	2,150	100,631

\* 출처 : 교통량정보제공 시스템

<Table 4> One-way traffic volume at the peak time in the tunnel

구분	Upward traffic volume at the peak(veh/hour)					
	a car	bus	small truck	heavy-duty truck	large truck	total
Cheong-gye	5,572	155	679	150	32	6,588
An-yang	4,665	131	568	125	26	5,515
Sapae-san	3,215	63	895	256	24	4,453
Surak-san	2,927	114	1064	318	97	4,520

④ 정체시간

정체시간은 서울도심터널과 소방대 도착시간을 분석한 결과 97.2%가 약 15분 정도 소요되었기에 이를 정체시간으로 설정하였다.

3.2 재난 안전비용 도출

3.2.1 기존 소화설비의 재난안전비용

① 시간가치비용 분석

기존 소화설비를 활용한 터널 화재진압 시 터널구간 전체 차로 통행이 차단되고 화재가 발생한 터널 후방에 정체로 인한 차량 대기 행렬이 발생된다. 이 대기행렬에 의한 교통정체 비용은 정체시간 15분, 20분, 25분으로 구분 적용한 개별 시간가치 비용과 운행비용을 산정토록 하였다. 먼저 통행시간가치 산정은 <식-1>을 적용하여 15분, 20분, 25분의 정체시간과 차종별 시간가치 그리고 분석교통량을 이용하였다. <Table 5>에서 보는바와 같이 적용 대상 구간에서의 통행시간 가치는 25분 > 20분 > 15분의 순으로 나타났으며, 이는 통행시간가치가 터널 자체의 길이보다 사고 발생으로 인한 정체시간이 지연과, 교통량이 많은 곳에서의 전체 통행시간가치 합이 높은 것으로 분석되었다.

<Table 5> Calculation of the time value of disaster safety using existing fire equipment

tunnel	Volume (veh/h)	delay time (min)	time value by car type(million won/hour)					total
			a car	bus	small truck	heavy-duty truck	large truck	
Cheong-gye (450m)	6,588	15	21.87	3.64	2.92	0.65	0.14	29.22
		20	29.15	4.86	3.89	0.86	0.19	38.94
		25	36.46	6.07	4.86	1.08	0.22	48.70
An-yang (390m)	5,515	15	18.31	3.08	2.44	0.53	0.12	24.48
		20	24.41	4.11	3.25	0.72	0.15	32.65
		25	30.52	5.14	4.07	0.89	0.19	40.81
Sapae-san (3,993m)	4,453	15	12.62	1.49	3.85	1.10	0.10	19.17
		20	16.83	1.96	5.12	1.46	0.14	25.51
		25	21.04	2.43	6.41	1.84	0.17	31.89
Surak-san (2,950m)	4,520	15	11.49	2.71	4.57	1.38	0.41	20.56
		20	15.32	3.55	6.10	1.82	0.55	27.35
		25	19.15	4.48	7.62	2.29	0.69	34.23

② 재난안전 운행비용 분석

재난안전 운행비용은 터널사고로 인한 교통정체 발생 후 사고처리가 완료될 때까지 10km/h 이하로 운행된다는

가정으로 정체시간 동안의 대기차량 운행비를 산정토록 하였다. 재난안전 운행비는 <식-2>의 운행비 산정식을 활용하여 터널 운행구간의 통과 교통량과 분석대상 터널길이, 운행비 원 단위를 이용하였다. 그 결과 터널별 운행비용은 <Table 6>과 같이 390m인 안양터널보다 450m인 청계터널이 높고, 뒤 이어 장대터널인 2,950m의 수락산터널, 그리고 최장대인 3,993m의 사패산터널이 가장 높았다.

<Table 6> Calculation of operation expenses of disaster safe using existing fire equipment

tunnel	delay time (m)	operating expenses by car type(million won/hour)					
		a car	bus	small truck	heavy-duty truck	large truck	total
Cheong-gye (450m)	15	1.31	0.06	0.14	0.05	0.01	1.57
	20	1.31	0.06	0.14	0.05	0.01	1.57
	25	1.31	0.06	0.14	0.05	0.01	1.57
An-yang (390m)	15분	0.95	0.05	0.10	0.04	0.01	1.15
	20분	0.95	0.05	0.10	0.04	0.01	1.15
	25분	0.95	0.05	0.10	0.04	0.01	1.15
Sapae-san (3,993m)	15분	6.72	0.23	1.65	0.74	0.10	9.44
	20분	6.72	0.23	1.65	0.74	0.10	9.44
	25분	6.72	0.23	1.65	0.74	0.10	9.44
Surak-san (2,950m)	15분	4.52	0.31	1.45	0.68	0.30	7.26
	20분	4.52	0.31	1.45	0.68	0.30	7.26
	25분	4.52	0.31	1.45	0.68	0.30	7.26

③ 재난안전 전체비용 분석

기존 소화설비 화재진압시스템이 고속도로 터널 내 화재진압 시에 발생하는 재난안전 전체비용 산정은 터널 내부에 발생한 사고로 교통정체가 발생하고 사고처리 완료까지 10km/h 이하로 운행하고 있다는 전제 하에 정체시간 동안 대기차량 운행비를 산정토록 하였다.

<Table 7> Total cost of disaster safety using existing fire facilities

tunnel	delay time (min)	the using the existing fire equipment				
		Volume (veh/hour)	sub-total	time value	operation expenses	
Short	Cheong-gye (450m)	15	6,588	30.79	29.22	1.57
		20		40.51	38.94	1.57
		25		50.27	48.7	1.57
	An-yang (390m)	15	5,515	25.63	24.48	1.15
		20		33.8	32.65	1.15
		25		41.96	40.81	1.15
	sub-total	15	12,103	56.42	53.7	2.72
		20		74.31	71.59	2.72
		25		92.23	89.51	2.72

tunnel	delay time (min)	the using the existing fire equipment				
		Volume (veh/hour)	sub-total	time value	operation expenses	
Long	Sapae-san (3,993m)	15	4,453	28.61	19.17	9.44
		20		34.95	25.51	9.44
		25		41.33	31.89	9.44
	Surak-san (2,950m)	15	4,520	27.82	20.56	7.26
		20		34.61	27.35	7.26
		25		41.49	34.23	7.26
	sub-total	15	8,973	56.43	39.73	16.7
		20		69.56	52.86	16.7
		25		82.82	66.12	16.7
합계	15	21,076	112.85	93.43	19.42	
	20		143.87	124.45	19.42	
	25		175.05	155.63	19.42	
평균			10,538	143.92	124.50	19.42

3.2.2 터널화재진압시스템(Water-Bulwark System)의 재난 안전비용

본 연구에서는 사전 개발된 터널 화재진압시스템(Water-Bulwark System) 소화설비를 이용하면 터널의 자동차 통행공간을 확보할 수가 있는 특성을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서 선정한 4개 터널에 터널 화재진압시스템(Water-Bulwark System) 소화설비를 이용할 경우 통행차로 1개 또는 2개 차로를 확보하여 차량의 통행이 가능하게 된다. 본 분석에서는 통행차로 1개 차로 확보 시 통과교통량의 4/1은 터널을 정상속도로 통과한다는 가정 하에 통과교통량의 3/4에 대한 통행시간가치와 운행비를 산정하였다. <Table 8>은 터널 내 통행차로 1개 차로 확보 시 교통정체 비용 산정을 위한 분석교통량은 전체 분석대상 터널 통과교통량의 3/4을 적용하여 산정하였다.

<Table 8> Analysis of traffic volume when securing one lane of a roadway

tunnel	upward traffic volume at peak time(veh/hour)					
	a car	bus	small truck	heavy-duty truck	large truck	total
Cheong-gye	4,179	116	509	113	24	4,941
An-yang	3,499	98	426	94	20	4,136
Sapae-san	2,411	47	671	192	18	3,340
Surak-san	2,195	86	798	239	73	3,390

① 재난안전 통행시간 가치

통행차로 1개 차로 확보 시 통행시간가치 산정은 앞서 분석한 바와 같이 <식-1>을 적용하면 15분, 20분, 25분

간의 정체시간과 차종별 시간가치, 통행차로 1개 차로 확보 시 교통량을 활용하였다. 1개 차로의 차로 확보시 재난 안전 통행시간가치 산정결과 교통량이 많은 터널의 통행 시간가치의 합이 큰 것으로 분석되었다. 통행차로 1개 확보 시 재난안전 통행시간가치의 합은 기존 소화설비 화재진압 시 산정한 재난안전 통행시간가치의 합보다 작은 것으로 분석되어 이는 통행차로 1개 차로 확보 시 정체차량의 통행으로 인해 기존 소화설비 화재진압 시에 비해 분석 교통량이 적기 때문인 것으로 분석된다.

<b>&lt;터널 교통량에 따른 재난안전 통행시간가치 크기&gt;</b> 청계터널 > 안양터널 > 수락산터널 > 사패산터널
<b>&lt;재난안전 통행시간가치 크기&gt;</b> 청계터널 > 안양터널 > 수락산터널 > 사패산터널
<b>기존 소화설비 화재진압 시 재난안전 통행시간가치 &gt; 통행 차로 1차로 확보 시 재난안전 통행시간가치</b>

② 재난안전 운행비용

교통정체가 발생하여 사고처리 완료 시까지 통행속도 10km/h 이하로 운행하고 있다는 가정 하에 정체시간 동안 대기차량의 운행비를 산정하였다.

앞서 도출한 바와 같이 재난안전 운행비는 <식-2>의 운행비 산정식을 활용하여 터널 내 운행구간의 정체 교통량과 분석대상 터널길이, 운행비 원 단위를 이용하였다. 운행비 산정결과 <Table 9>와 같이 기존 화재설비를 이용하는 경우보다 정체 차량이 적어 운행비가 낮게 분석되었으며, 역시 분석대상 터널의 길이에 따라 운행비 차이가 나타나 터널의 길이가 길수록 운행비용이 높게 산정되었다.

<b>&lt;정체시간에 따른 재난안전 운행비용&gt;</b> 15분=20분=25분
<b>&lt;터널 길이에 따른 재난안전 운행비용 크기&gt;</b> 사패산터널 > 수락산터널 > 청계터널 > 안양터널
<b>&lt;교통량에 따른 재난안전 운행비용 크기&gt;</b> 사패산터널 > 수락산터널 > 청계터널 > 안양터널
<b>기존 소화설비 화재진압 시 재난안전 운행비용 &gt; 통행차로 1개 차로 확보 시 재난안전 운행비용</b>

<Table 9> Calculation of Disaster Safety Operating Cost using Water-Bulwark System in case of one lane withing the tunnel)

tunnel	delay time (min)	*차종별 운행비(백만원/시)					
		a car	bus	small truck	heavy-duty truck	large truck	total
Cheong-gye (450m)	15	0.98	0.05	0.11	0.04	0.01	1.19
	20	0.98	0.05	0.11	0.04	0.01	1.19
	25	0.98	0.05	0.11	0.04	0.01	1.19

tunnel	delay time (min)	*차종별 운행비(백만원/시)					
		a car	bus	small truck	heavy-duty truck	large truck	total
An-yang (390m)	15	0.71	0.03	0.08	0.03	0.01	0.86
	20	0.71	0.03	0.08	0.03	0.01	0.86
	25	0.71	0.03	0.08	0.03	0.01	0.86
Sapae-san (3,993m)	15	5.04	0.17	1.23	0.56	0.08	7.08
	20	5.04	0.17	1.23	0.56	0.08	7.08
	25	5.04	0.17	1.23	0.56	0.08	7.08
Surak-san (2,950m)	15	3.39	0.23	1.08	0.51	0.22	5.43
	20	3.39	0.23	1.08	0.51	0.22	5.43
	25	3.39	0.23	1.08	0.51	0.22	5.43

\* 차종별 운행비=터널길이(km)×차종별 시간교통량(대/시)×차종별 운행비 원 단위(10km/h)

③ 재난안전비용

본 논문에서 선택한 Water-Bulwark System을 적용할 경우, 터널 내 통행차로 1개 차로 확보 시 재난안전 전체비용은 터널 내 사고로 인해 교통정체가 발생하여 사고처리 완료 시까지 통행속도 10km/h 이하로 운행하고 있다는 가정 하에 <Table 10>과 같이 정체시간 동안 대기차량의 운행비를 터널 내 대피차로 1개 차로 확보 시 재난안전비용을 산정하였다.

<Table 10> Total cost of disaster safety when secured by one lane in a tunnel(Applying the Water-Bulwark System)  
 (단위 : 백만원/시간)

tunnel	delay time (min)	Volume (veh/hour)	secured one pass-way			
			sub-total	time value	operation expenses	
Short	Cheong-gye (450m)	15	4,941	23.07	21.88	1.19
		20		30.41	29.22	1.19
		25		37.63	36.44	1.19
	An-yang (390m)	15	4,136	19.25	18.39	0.86
		20		25.34	24.48	0.86
		25		31.45	30.59	0.86
	sub-total	15	9,077	42.32	40.27	2.05
		20		55.75	53.70	2.05
		25		69.08	67.03	2.05
Long	Sapae-san (3,993m)	15	3,340	21.47	14.39	7.08
		20		26.25	19.17	7.08
		25		31.05	23.97	7.08
	Surak-san (2,950m)	15	3,390	20.79	15.36	5.43
		20		25.99	20.56	5.43
		25		31.1	25.67	5.43
	sub-total	15	6,730	42.26	29.75	12.51
		20		52.24	39.73	12.51
		25		62.15	49.64	12.51

tunnel	delay time (min)	secured one pass-way			
		Volume (veh/hour)	sub-total	time value	operation expenses
Total	15	15,807	84.58	70.02	14.56
	20		107.99	93.43	14.56
	25		131.23	116.67	14.56
Average		7,904	107.93	93.37	14.56

### 3.3 소결론

재난안전 시간가치 비용을 분석한 결과 <Table 11>와 같이 통행차로가 없는 기존 소화설비의 정체시간은 15분보다 20분이 크고, 이 보다는 25분의 값이 더 큰 것으로 나타났고 기존 소화설비와 터널 화재진압시스템(Water-Bulwark System)의 통행차로 1개 차로 확보 시 정체시간은 15분 < 20분 < 25분의 값이 더 큰 것으로 분석되었다.

<Table 11> A Comparative analysis od disaster safety cost between Two systems

		disaster safety time-value cost	disaster safty operation cost
existin g fire facilities (no traffic lanes)	delay time(min)	15 < 20 < 25	15 = 20 = 25
	tunnel length(m)	length irrelevant	the longer, the bigger An-yang(390) <Cheo ng-gye(450) <Surak-san(2,950) <Sapae-san(3,993)
	tunnel traffic volume (vehicle/hour)	more volume, more bigger it is cheong-gye(6,588)> An-yang(5,51)> Surak-san(4,520)> Sapae-san(4,453)	volume irrelevant
	average cost size (a million won/ hours)	143.92	
Water - Bulwark System	delay time(min)	15 < 20 < 25	15 = 20 = 25
	tunnel length(m)	length irrelevant	the longer, the bigger An-yang(390) <Cheo ng-gye(450) <Surak-san(2,950) <Sapae-san(3,993)
	tunnel trffic volume(vehi cle/hour)	more volume, more bigger it is Cheong-gye(4,941)> An-yang(4,136) > Surak-san(3,390)> Sapae-san(3,340)	volume irrelevant
	average cost size (a million won/ hours)	existing fire facilities(143.92) > securing one-pass way(water-Bulwark system) (107.93)	

재난안전 시간가치 비용은 터널 길이는 크게 영향이 없고, 터널 내의 교통량이 크게 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 소요 비용은 기존 소화설비가 제일 커 경제성 측면에서도 Water-Bulwark System이 효율적인 것으로 분석되었다.

재난안전 운행비용 분석 결과에서는 정체시간은 15분 · 20분 · 25분 모두 기존 소화설비와 Water-Bulwark System의 통행차로 1개 차로 확보 경우가 같은 것으로 나타났으며, 터널 길이의 관계에는 통행차로가 없는 기존 소화설비와 Water-Bulwark System의 통행차로 1개 차로를 확보 경우 모두 터널 길이가 길수록 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 또한 터널의 교통량과 터널 길이의 관계에서는 통행차로가 없는 기존 소화설비와 Water-Bulwark System의 통행차로 1개 차로 확보한 경우 모두 터널 길이가 긴 장대터널이 재난안전 운행비용이 큰 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 재난안전 운행비용 크기는 기존 소화설비가 제일 크고, 다음으로 통행차로 1개 차로 확보한 때가 다음으로 분석되었다.

## 4. 결론 및 향후과제

### 4.1 결론

최근 소방청은 2022년 12월부터 ‘화재의 예방 및 안전 관리에 관한 법률(화재예방법)’과 소방시설 설치 및 안전 관리에 관한 법률(소방시설법)의 하위 법령 개정을 입법 예고하였다. 개정안의 주요 내용으로는 소방시설법 하위 법령에서의 성능위주 소방설계 대상물 확대 및 소방시설 자체점검 제도 등은 기존 화재 시설물의 작동 성능 향상을 위해 새로운 시설물의 개발 및 도입 확대가 예상된다. 이는 사업자로 하여금 기존 시설물과의 성능 비교분석을 통해 새로운 화재시스템의 도입 여부를 결정할 것이며, 이는 결국 성능 대비 경제성을 확보할 수 있는 결과로 귀결될 것이다.

이에 따라 본 연구에서는 최근 차량의 고속화의 일환으로 추진되어진 장대터널에서의 고성능 화재진압시스템(Water-Bulwark System)의 기존 시스템 대비 효과 검증과 경제성에 대해 재난안전 비용의 관점에서 그 비교 우위를 분석하고자 하였다. 또한 이 논문은 Water-Bulwark System 개발에 관한 기술 논문의 후속으로 해당 시스템의 경제적 타당성을 도출하고자 하였다.

분석 결과 분석 대상 터널을 짧은 터널(안양터널 390m, 청계터널 450m)과 장대터널(수락산터널 2,950m, 사패산터널 3,933m)로 구분하여 개선 효과를 분석한 결과 터널

<Table 12> A Comparative analysis of improvement effects(secured one-pass lane)

Tunnel		delay time (min)	existing fire facilities			Water-Bulwark System			Improve effect (%)		
			volume (veh/hour)	sub-total	time-value	Operating cost	volume (veh/hour)	sub-total		time-value	Operating cost
Short	Cheong-gye (450m)	15	6,588	30.79	29.22	1.57	4,941	23.07	21.88	1.19	25.0
		20		40.51	38.94	1.57		30.41	29.22	1.19	24.9
		25		50.27	48.7	1.57		37.63	36.44	1.19	25.1
	An-yang (390m)	15	5,515	25.63	24.48	1.15	4,136	19.25	18.39	0.86	24.9
		20		33.8	32.65	1.15		25.34	24.48	0.86	25.0
		25		41.96	40.81	1.15		31.45	30.59	0.86	25.0
	sub-total	15	6,052	56.42	53.7	2.72	4,539	42.32	40.27	2.05	25.0
		20		74.31	71.59	2.72		55.75	53.70	2.05	25.0
		25		92.23	89.51	2.72		69.08	67.03	2.05	25.1
	average			74.32	71.6	2.72		55.72	53.67	2.05	25.0
Long	Sapae-san (3,993m)	15	4,453	28.61	19.17	9.44	3,340	21.47	14.39	7.08	25.0
		20		34.95	25.51	9.44		26.25	19.17	7.08	24.9
		25		41.33	31.89	9.44		31.05	23.97	7.08	24.9
	Surak-san (2,950m)	15	4,520	27.82	20.56	7.26	3,390	20.79	15.36	5.43	25.3
		20		34.61	27.35	7.26		25.99	20.56	5.43	24.9
		25		41.49	34.23	7.26		31.1	25.67	5.43	25.0
	sub-total	15	4,487	56.43	39.73	16.7	3,365	42.26	29.75	12.51	25.1
		20		69.56	52.86	16.7		52.24	39.73	12.51	24.9
		25		82.82	66.12	16.7		62.15	49.64	12.51	25.0
	average			69.60	52.90	16.7		52.22	39.71	12.51	25.0
average sum			5,270	71.96	62.25	9.71	3,952	53.97	46.69	7.28	25.0

화재진압시스템(Water-Bulwark System)을 적용하여 통행차로 1개 차로를 확보할 경우, 25%의 개선 효과가 발생하는 것으로 분석되었다. 이 것은 짧은 터널과 장대터널의 교통 정체비용 중 큰 비중을 차지하는 시간가치 비용은 터널의 길이가 아니라 정체시간과 교통량에 따라 차이가 발생하기 때문인 것으로 분석되었다.

또한 Water-Bulwark System을 적용하여 초기 화재진압 시 재난안전 절감 효과 측면에서는 통행차로 1개 확보 시 연간 1,522억원의 절감 효과를 볼 수 있을 것으로 분석되었다.

#### 4.2 향후과제

본 논문은 기존 소화설비와 새롭게 개발된 Water-Bulwark System간의 효능분석을 통해 향후 발생 우려가 있는 대형 터널 내 화재사고 발생 시 피해를 최소화하기 위한 대책을 수립하기 위한 것으로 본 논문에서 제시한 터널 내 1개의 소화 통행차로를 확보했을 때를 가정한 것이다. 이외에도 길어깨, 2개 통행차로 확보 등의 추가 대안과의 비교 분석을 통해 더 안전하고 효율적인 터널 내 소

화설비의 개발을 추진할 필요가 있을 것이다.

#### 5. References

- [1] M. Son, J. Cheon, Y. Cho, B. Kim(2023), "Review of fire resistance evaluation and fire resistance method of concrete segment lining for fire in tunnel." Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 25(2):121-139.
- [2] J. Park, Y. Yoo, Y. Kim, B. Park, W. Kim, S. Park(2019), "Development of remote control automatic fire extinguishing system for fire suppression in double-deck tunnel." Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 21(1):167-175.
- [3] H. Kim, J. H. Lee(2017), "Scenarios for effective fire fighting operations during tunnel fires." Korean Institute of Fire Science and Engineering, 31(5): 167-175.

- [4] K. H. Park, J. O. Yoo(2012), "A study on use of quantitative risk analysis on life safety performance for the effect of fixed fire fighting system at road tunnel fires." Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 14(12):1-22.
- [5] J. Park, C. Shim(2017), "Quantitative risk analysis for railway tunnels." Journal of the Korean Society for Railway, 20(3):400-412.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015), A study on the establishment and management guidelines for road tunnel disaster prevention facilities. Korea Tunnel Subterranean Space Society.
- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017), Traffic statistics tear 2017 (Traffic survey analysis results). TMS Traffic Volume Information Provision System.
- [8] Y. Kim(2014), "A study on the problems and improvement measures of road tunnel firefighting facilities." Master's thesis, Department of Fire and Disaster Prevention Engineering at Gachon University. pp. 55-74.
- [9] K. Lee(2019), "A study on the analysis and evaluation of micro-traffic characteristics through analytical model development of highway tunnel section." Doctoral dissertation, Department of Construction and Transportation Engineering at Ajou University. pp. 71-86.
- [10] S. Lee(2018), "A study on the effect of reinforcement of upper limb on the relaxation height of tunnel." Doctoral dissertation, Civil Engineering at Dongui University, pp. 54-63.

## 저자 소개



### 백충현

경기대학교 도시방재학과 공학박사  
 건설안전기술사, 토목품질시험기술사  
 現 ㈜서현기술단 부사장  
 前 경기도청 광역도시철도과장  
 관심 분야 : 철도 및 도로 건설안전